

УДК 621.924.3

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ С ЧПУ С УЧЕТОМ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

А.Д. Алмаваиш, П.П. Переверзев

В данной статье описывается решение проблемы установления взаимосвязи технологических параметров круглого шлифования с ЧПУ с динамическими параметрами технологической системы. Проведен сравнительный анализ влияния массы заготовки, степени затупления зерен шлифовального круга и податливости технологической системы изменений фактических подач при шлифовании детали в автоматическом ступенчатом цикле управления программной подачей.

Ключевые слова: круглое шлифование, цикл, программная и фактическая подача, динамика процесса.

Шлифование обычно используется в качестве конечной операции обработки при производстве прецизионных компонентов, требующих гладких поверхностей и небольших допусков. Вопросы оптимизации режимов резания при шлифовании рассмотрены в небольшом количестве работ [1–5]. Однако из-за сложности системного моделирования процессов съема металла при шлифовании, с учетом динамических свойств технологической системы, оказывающей большое влияние на формирования погрешностей размеров обрабатываемой поверхности и параметров качества поверхностного слоя, до сих пор отсутствуют САМ-системы, позволяющие производить расчет оптимальных режимов резания [6–8].

Кроме того, характеристики обрабатываемых поверхностей, такие как шероховатость поверхности и отклонения формы и расположения поверхностей детали, в значительной степени зависят от динамических характеристик станка, то есть его состояния, динамики, настройки, а также от параметров процесса [10, 11]. Доступная литература показывает, что такие вопросы были тщательно изучены и рассмотрены аналитически [10]. Тем не менее, из-за сложностей, связанных с учетом динамических свойств технологической системы и многочисленных факторов, влияющих на протекание процесса шлифования, обеспечение качества обрабатываемой поверхности зависит от опыта оператора станка с ЧПУ [11]. Обычно желаемые параметры процесса определяются на основе опыта или пробных испытаний. Однако это не гарантирует, можно ли получить истинные или почти оптимальные результаты шлифования цилиндрических поверхностей или нет. Поэтому для промышленности очень важно найти простой и эффективный метод виртуального эксперимента, который можно исполь-

зовать для быстрой оптимизации параметров круглого шлифования [12]. Износ шлифовального круга при шлифовании оказывает непосредственное влияние на качество обрабатываемой детали из-за ее вибрации [12, 13]. Поэтому обеспечение максимально возможной производительности операций круглого шлифования, выполняемых на станках с ЧПУ, путем подбора оптимальных циклов управления радиальной подачей с учетом динамики процесса [14]. Таким образом, поиск оптимальных параметров процесса все еще является проблемой с точки зрения производственного процесса.

Целью работы является повышение производительности операций круглого шлифования, выполняемых на станках с ЧПУ, путём применения математической модели, устанавливающей взаимосвязь динамических свойств технологической системы с параметрами процесса съема металла при круглом шлифовании с радиальной подачей.

Моделирование динамических свойств технологической системы

Модель расчета (1–6) параметров процесса съема металла при круглом шлифовании с учетом динамики процесса [14] на станках с ЧПУ для заданного автоматического ступенчатого цикла шлифования, описывает съем металла с учетом массы заготовки m . На рис. 1 приведена расчетная одномассовая динамическая схема круглого шлифования с радиальной подачей. Уравнение баланса сил в динамической системе резания представлено в уравнении (1):

$$m\ddot{y} + h\dot{y} + cy = P_y, \quad (1)$$

где P_y – радиальная сила резания; характеристики технологической системы (m – масса заготовки; c – жесткость (ТС); h – линейный коэффициент демпфирования, характеризующие показатели диссипации энергии рассматриваемых элементов).

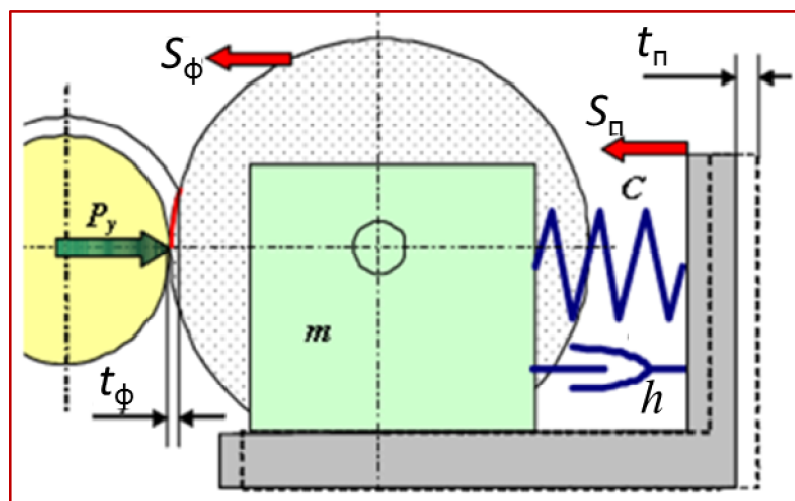


Рис. 1. Расчетная одномассовая динамическая схема круглого шлифования с радиальной подачей

Используем аналитическую формулу (2) радиальной составляющей силы резания для круглого шлифования с осевой подачей [15, 16]

$$P_y = K_1 S_\phi + K_2 \sqrt{S_\phi} = K_3 \Delta t_\phi + K_4 \sqrt{\Delta t_\phi}. \quad (2)$$

После подстановки уравнения (2) радиальной силы резания в (1), и проведения ряда преобразований, получена формула (3) для расчета текущих значений фактической радиальной подачи $\Delta t_{\phi z, i}$ в зависимости от массы заготовки m и других технологических параметров

$$\Delta t_{\phi z, i} = \left[\frac{-jK_4}{2(1+jK_3)} + \sqrt{\left(\frac{jK_4}{2(1+jK_3)} \right)^2 + \frac{\Delta t_{nz, i} + jP_{y z, i-1} + jm(\ddot{y}_{z, i} - \ddot{y}_{z, i-1})}{(1+jK_3)}} \right]^2. \quad (3)$$

На основе фактической радиальной подачи $\Delta t_{\phi z, i}$, по формулам (4–6) можно рассчитать скорость фактической подачи S_ϕ , накопленную фактическую подачу t_ϕ и время τ съема припуска

$$S_{\phi z, i} = \frac{\Delta t_{\phi z, i}}{\Delta \tau_{z, i}}, \quad (4)$$

$$t_\phi = \sum_1^z \sum_1^i \Delta t_{\phi z, i}, \quad (5)$$

$$\tau = \sum_1^z \sum_1^i \Delta \tau_{z, i}, \quad (6)$$

где j – податливость ($j = 1/c$); z – порядковый номер ступени; i – порядковый номер оборота круга на z -ой ступени; $\Delta t_{\phi z, i}$ и $\Delta t_{nz, i}$ – фактическая и программная подача на i -ом обороте z -ой ступени, мм/об; S_n , S_ϕ – скорость программной и фактической радиальной подачи; $\ddot{y}_{z, i}$ – ускорение упругих деформаций; t_ϕ – заданная величина припуска на сторона мм; τ – время съема припуска мин K_1 , K_2 , K_3 и K_4 – коэффициенты уже рассчитано [14], при

$$K_1 = \pi d B \frac{\sigma_i \varepsilon_i \operatorname{tg} \beta}{V_k}; \quad K_2 = \eta B \frac{\sigma_i}{3} \sqrt{\frac{dD}{n(d+D)}}; \quad K_3 = \pi d B n \frac{\sigma_i \varepsilon_i \operatorname{tg} \beta}{V_k};$$

$$K_4 = \eta B \frac{\sigma_i}{3} \sqrt{\frac{dD}{(d+D)}};$$

σ_i – интенсивность напряжений, Н/мм²; d – диаметр детали, мм; D – диаметр круга, мм; B – ширина круга, мм; V_k – скорость вращения заготовки, м/с; n – оборот заготовки, об./мин; ε_i – интенсивности степени деформации; β – угол резания; η – степень затупления.

На рис. 2 приведен график программных и фактических подач, рассчитанный по формулам (3–6).

На основании полученных формул (1–6), которые представляют собой динамическую модель процесса круглого шлифования с радиальной подачей, проведен сравнительный анализ влияния массы заготовки на интенсивность изменения следующих ключевых технологических факторов, влияющих на силу резания и фактическую подачу: фактическую подачу, степень затупления зерен шлифовального круга и податливости технологической системы (см. таблицу) при ступенчатом цикле управления программной подачей $\Delta t_{nz, i}$.

Результаты расчетов приведены на рис. 3–5.

Таблица

Входные данные параметров

№	Параметр	Величина		
1	Масса (m), кг	0	1	5
2	Податливость (j), мм/кг	0,003	0,005	
3	Степень затупления (η)	0,01	0,03	

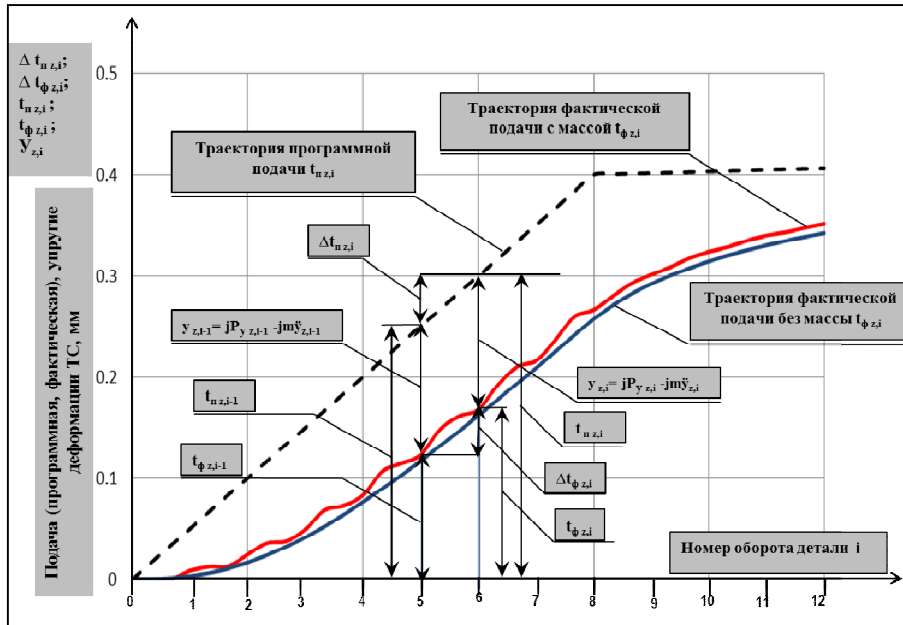


Рис. 2. Перемещение программной и фактической подачи с массой и без массы [14]

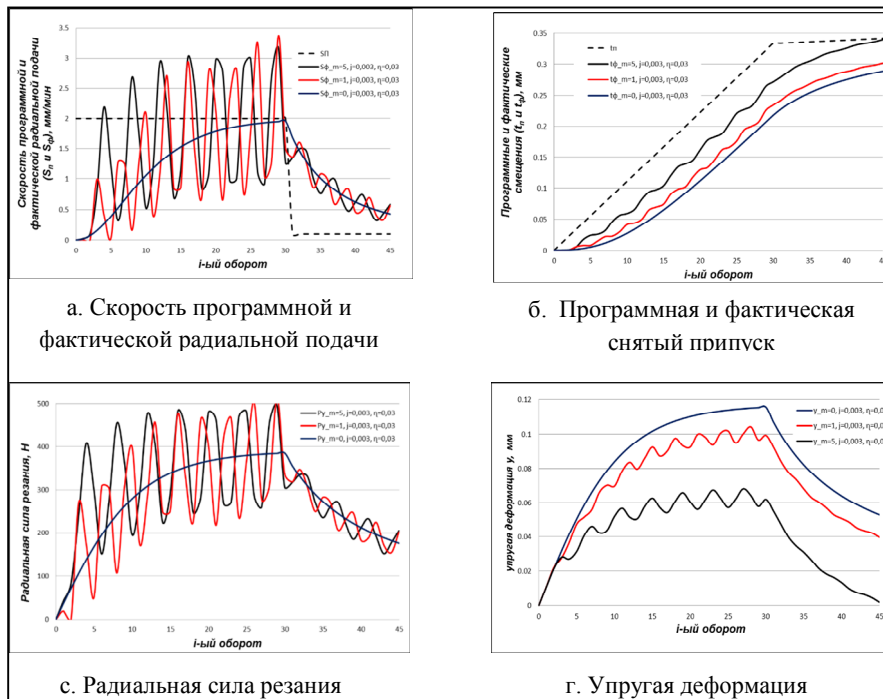


Рис. 3. Влияние массы заготовки на параметры цикла круглого шлифования

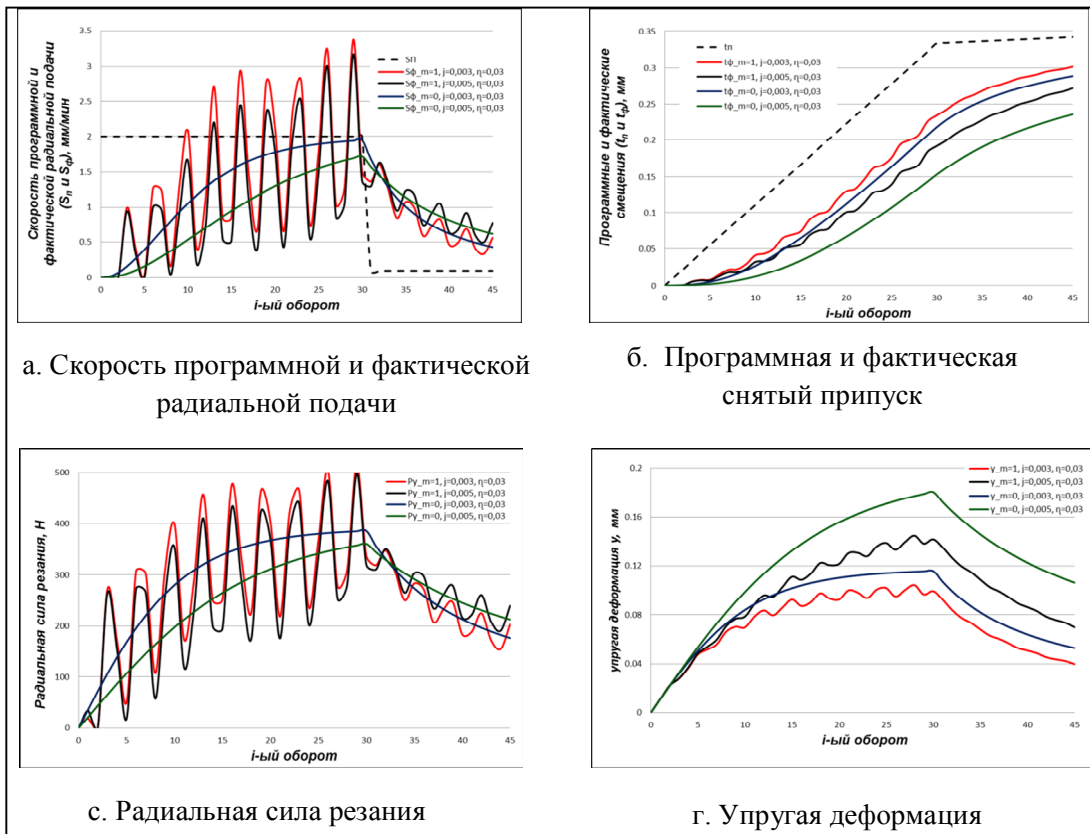


Рис. 4. Влияние податливости технологической системы и массы заготовки на параметры цикла круглого шлифования

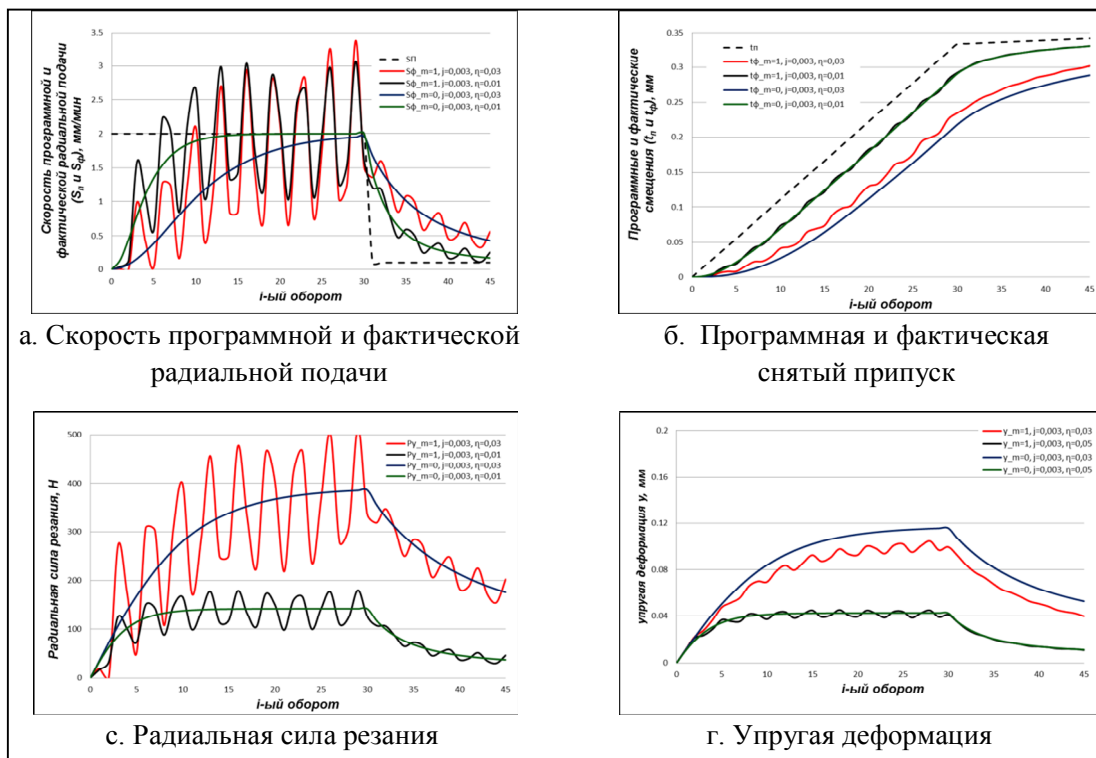


Рис. 5. Влияние степени затупления и массы заготовки на параметры цикла круглого шлифования

На основании полученных графиков сделаны следующие выводы по влиянию массы заготовки на параметры процесса шлифования.

1. Влияние массы заготовки

На рис. 3 показан график влияния массы заготовки на процесс круглого шлифования. Увеличение массы увеличивает фактическую радиальную подачу и её скорость, силу резания (см. рис. 3, а, б, с. С ростом массы заготовки существенно увеличивается амплитуда колебания силы резания и ее величина. С увеличением массы уменьшается упругая деформация (см. рис. 3, г). Поэтому время съема припуска меньше до 8% при $m = 1$ и 20% при $m = 5$, по сравнению с процессом при $m = 0$.

2. Влияние податливости технологической системы и массы заготовки

На рис. 4 показано влияние податливости на процесс круглого шлифования. С увеличением податливости технологической системы и массы заготовки наблюдается рост силы резания, амплитуда ее колебания и колебание упругой деформации (см. рис. 4). При этом с увеличением податливости увеличивается время съема припуска на 24% при $m = 0$ и 17% при $m = 1$.

3. Влияние степени затупления зерен круга и массы заготовки

На рис. 5 показано влияние степени затупления на процесс круглого шлифования, поскольку увеличение степени затупления имеет такое же поведение, как и увеличение податливости (см. рис. 5). С ростом степени затупления и массы заготовки происходит рост силы резания и амплитуды ее колебания. Это объясняет, почему время съема припуска больше до 32% при $m = 0$ и 21% при $m = 1$, чем $\eta = 0,003$.

Выводы

На основании разработанной математической модели, устанавливающей взаимосвязь динамических свойств технологической системы с параметрами процесса съема металла при круглом шлифовании с радиальной подачей, позволило проводить уточненные значения силы резания и других параметров цикла шлифования, влияющих на точность обрабатываемых размеров и качество поверхностного слоя. Проведенное исследование показало существенную роль динамических свойств технологической системы и необходимость их учета при расчете оптимальных циклов круглого шлифования.

Библиографический список

1. Saljé, E. Optimization of Short Grinding Cycles / E. Saljé, H. Mushardt, E. Sherf // Annals of the CIRP. – 1980. – Vol. 29, № 2. – С. 477–495.
2. Peters, J. Optimization Procedure of Three Phase Grinding Cycles of a Series Without Intermediate Dressing / J. Peters, R. Aerens // Annals of the CIRP. – 1980. – Vol. 29. – С. 195–199.

3. Peters, J. Contribution of the ĀIRP Research to Industrial Problems in Grinding / J. Peters // Annals of the CIRP. – 1984. – 33/2. – С. 451–468.
4. Malkin, S. Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives / S. Malkin // Chapter 10, Optimization, Adaptive Control, and Intelligent Grinding. – New York John: Wiley & Sons. – 1989.
5. Xiao, G. Autonomous System for Multistage Cylindrical Grinding / G. Xiao, S. Malkin, K. Danai // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – 1993. – 115/4. – С. 667–672. DOI: 10.1115/1.2899194.
6. Cylindrical grinder. – URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Cylindrical_grinder#References (дата обращения: 15.04.2020).
7. Kalpakjian, S. Manufacturing Processes for Engineering Materials / S. Kalpakjian, S. Schmid // Pearson Education Inc. Prentice Hall. – 5th ed. – 2008.
8. Alsigar, M.K. Model of processing accuracy prediction with consideration of multi-stage process of circular grinding with axial feed / M.K. Alsigar, P.P. Pereverzev, A.D. Almawash // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – 709. – 033006. DOI:10.1088/1757-899X/709/3/033006.
9. Bueno, R. Geometric and dynamic stability in centerless grinding / R. Bueno, M. Zatarain, J. Aguinagalde // CIRP Ann 39/1 (1990). – С. 395–398.
10. Hashimoto, F. Optimization of set-up conditions for stability of the centreless grinding process / F. Hashimoto, G. Lahoti // CIRP Ann Manuf Technol. – 2004. – 53/1. – С. 271–274.
11. Siddiquee, A.N. Grey relational analysis coupled with principal component analysis for optimisation design of the process parameters in in-feed centreless cylindrical grinding / A.N. Siddiquee, Z.A. Khan, Zulquernain Mallick // Int J Adv Manuf Technol. – 2010. – 46/9. – С/ 983–992. DOI 10.1007/s00170-009-2159-8.
12. Almawash, A.D. Model of processing accuracy prediction with consideration of multi-stage process of circular grinding with axial feed / A.D. Almawash, P.P. Pereverzev, M.K. Alsigar // international conference industrial engineering – ICIE-2020, принят к публикации.
13. Переверзев, П.П. Теория и методика расчета оптимальных циклов обработки деталей на круглошлифовальных станках с программным управлением / П.П. Переверзев // дис. ... д-ра. техн. наук. – Челябинск, 1999.
14. Иоголевич, В.А. Повышение производительности и точности обработки на круглошлифовальных станках с ЧПУ на основе учёта динамических свойств процесса шлифования / В.А. Иоголевич // дис. ... канд. техн. наук. – Челябинск, 1992.
15. Переверзев, П.П. Моделирование и оптимизация управляющих программ для станков с ЧПУ с использованием динамического программирования / П.П. Переверзев, Д.Ю. Пименов // СТИН. – 2014. – № 8. – С. 16–24.

[К содержанию](#)